

# АДАПТИВНАЯ ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ\*

АВТОРЫ:

В.А. ЕФРЕМОВ,  
ООО «ИЦ «БРЕСЛЕР»

М.В. МАРТЫНОВ,  
ООО «ИЦ «БРЕСЛЕР»

А.А. ГАЙДАШ,  
АКЦИОНЕРНОЕ  
ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ  
«ТЮМЕНЬЭНЕРГО»

А.В. БУРОВ,  
АКЦИОНЕРНОЕ  
ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКИ  
И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ  
«ТЮМЕНЬЭНЕРГО»

Использование в релейной защите современных элементов микропроцессорной техники делает возможным существенно повысить точность определения места повреждения ЛЭП. Причем эффективность и скорость реакции дистанционной защиты зависит

от объема получаемой и обрабатываемой информации. Именно поэтому в настоящее время весьма востребованы современные высокоскоростные алгоритмы определения конкретной зоны повреждения, способные настраиваться на конкретный тип повреждения в линии электропередачи.

**Ключевые слова:** адаптивная дистанционная защита; избиратель поврежденных фаз; фильтр аварийных составляющих; информационные модели энергосистемы.



Быстрое и точное определения конкретной зоны повреждения линий электропередач существенно снижает материальные потери, связанные с этим повреждением

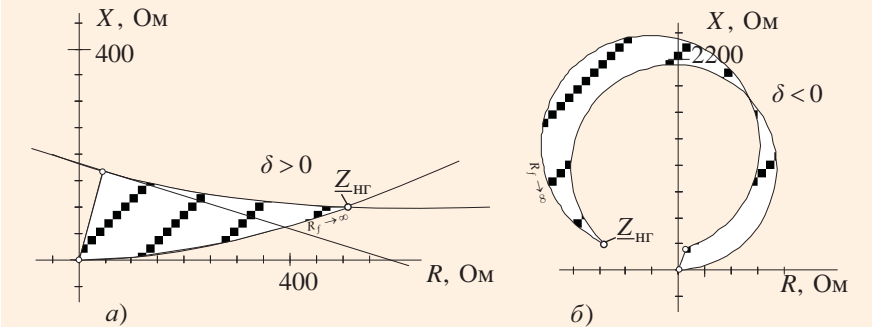
## ВВЕДЕНИЕ

Вот уже более 20 лет на российском рынке релейной защиты и автоматики (РЗА) внедряются цифровые устройства защиты. Они привнесли в работу хороший сервис, диагностику, управляемость, удобство работы, спорный МЭК 61850 и пр. Можно долго перечислять достоинства микропроцессорных РЗА (МП РЗА) по сравнению с электромеханикой и только в самом конце списка следует добавить «еще и более совершенные алгоритмы». С точки зрения сегодняшнего уровня алгоритмизации РЗА, будем различать «классические» и «адаптивные» защиты. «Классической» будем называть РЗА, которая для своего функционирования использует информацию только о текущих токах  $i(t)$ , напряжениях  $u(t)$  и их комбинации, например, мощности  $p(t)$ .

Введем понятие «адаптивной» РЗА, которая адаптирует (изменяет) свои характеристики срабатывания в зависимости от параметров доаварийного (предшествующего) режима (см., например, [1, 2]). В более общем случае прямая адаптация производится в дискретном пространстве, подразделенном на ячейки [3, 4]. Способы косвенной адаптации в релейной защите ведут свое начало от широко известного реле Бреслера [5]. Их можно интерпретировать при помощи представлений об алгоритмических моделях объекта, осуществляющих преобразование наблюдаемых величин в напряжения и токи места предполагаемого повреждения [6, 7].

Основное преимущество МП РЗА перед электромеханической РЗА — возможность использования информации о предшествующем режиме. Даже в современных МП РЗА, реализованных по канонам «классических» РЗА, такая информация практически

## ОТОБРАЖЕНИЕ НА ПЛОСКОСТИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ГРАНИЦ ГОДОГРАФОВ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕДАЧИ МОЩНОСТИ НА ЛЭП



а — прямая передача; б — обратная передача мощности.

Рис. 1

## ХАРАКТЕРИСТИКА СРАБАТЫВАНИЯ АДАПТИВНОГО РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗАМЕРА ПРИ ПРЯМОЙ (А) И ОБРАТНОЙ (Б) ПЕРЕДАЧЕ МОЩНОСТИ НА ЛЭП

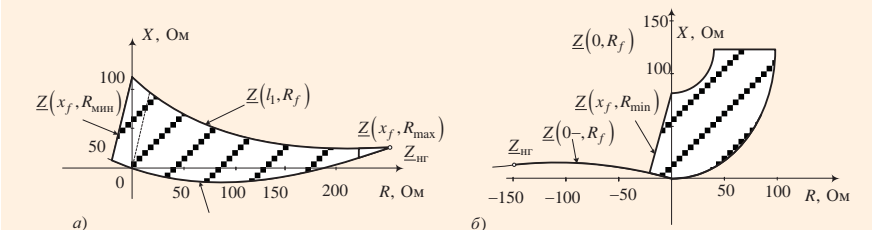


Рис. 2

не применяется. Использование сведений о предшествующем режиме  $i_{пред}(t)$  и  $u_{пред}(t)$  значительно увеличивает объем информации, который применяется для принятия решения.

Известно, что разница между текущим и предшествующим режимами определяется как аварийный режим, источником которого является место повреждения/коммутации. Таким образом, аварийные

\* Репринт статьи из журнала «Релейная защита и автоматизация» №4 2015. Публикуется с разрешения редакции.

составляющие  $i_{аб}(t) = i(t) - i_{пред}(t)$ ,  $u_{аб}(t) = u(t) - u_{пред}(t)$  несут полную информацию об аварии: место (зона) повреждения, вид повреждения, поврежденные фазы.

## АДАПТИВНАЯ РЗА

Адаптивная РЗА базируется на аварийных составляющих. Некоторые элементы адаптивных РЗА — избиратель поврежденных фаз и вида повреждения на базе аварийных составляющих — уже прошли многолетнюю апробацию в качестве избирателя поврежденных фаз (ИПФ) в устройствах однофазного автоматического включения (ОАПВ) производства ООО «ИЦ «Бреслер». Более чем за десятилетнюю историю использования ИПФ не зафиксировано ни одного неселективного действия. Кроме того, ИПФ не требует расчета параметров срабатывания (уставок).

Адаптивная система релейной защиты строится на базе реле с двумя подведенными величинами, например, так строится адаптивная дистанционная защита (АДЗ). Для АДЗ необходимы алгоритмы для всех видов повреждений с высокой чувствительностью срабатывания. Параметры срабатывания адаптивных систем зависят от величин предшествующего режима и автоматически подстраиваются под нагрузочный режим, т.е. АДЗ по принципу действия не требует расчета параметров срабатывания защит. Для таких систем важен алгоритм функционирования (алгоритм первичен), а характеристика срабатывания на плоскости всегда вторична и служит для отображения областей нахождения годографа сопротивлений в рассматриваемых режимах. Заметим, что адаптация с помощью характеристик РС (уменьшения характеристики срабатывания при увеличении нагрузочного ре-

## ОБЪЕКТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АДАПТИВНОЙ И «КЛАССИЧЕСКОЙ» ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

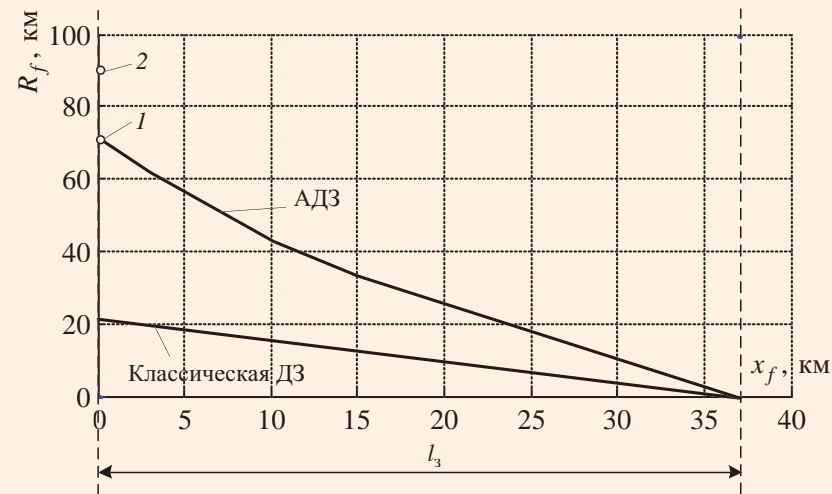


Рис. 3

## ОСЦИЛЛОГРАММА РАБОТЫ АДЗ ПРИ $x_f=0,1$ КМ, $R_f=70$ ОМ

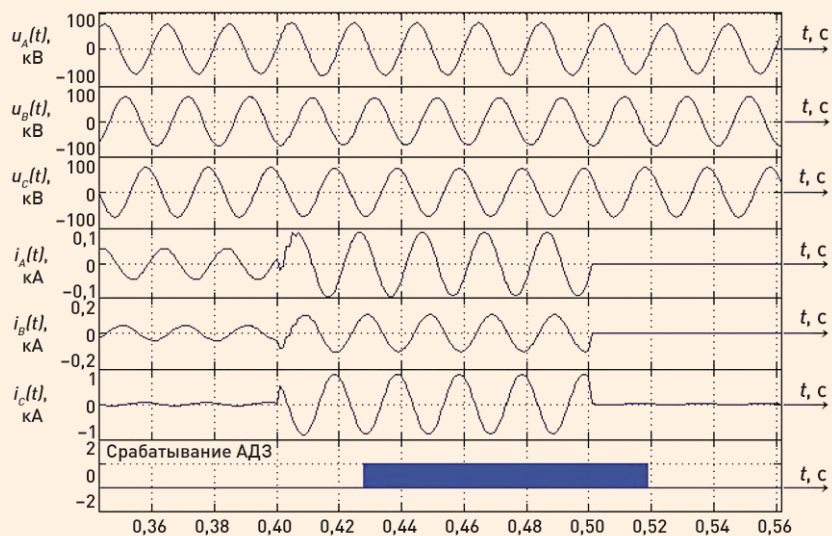


Рис. 4

## ПАРАМЕТРЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ЗАДАНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 1-Й СТУПЕНИ В ТЕРМИНАЛЕ ЗАЩИТЫ

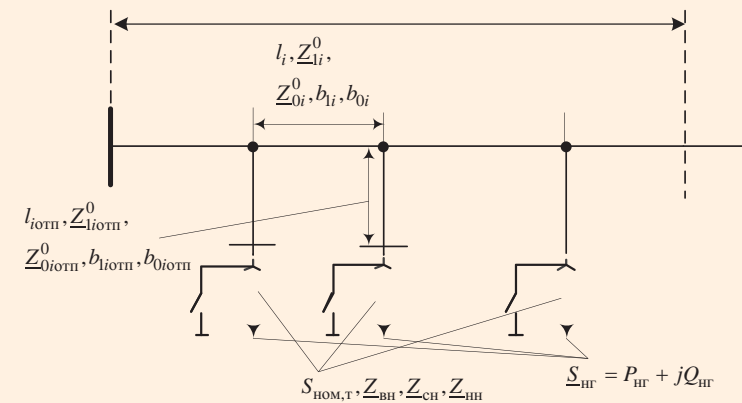
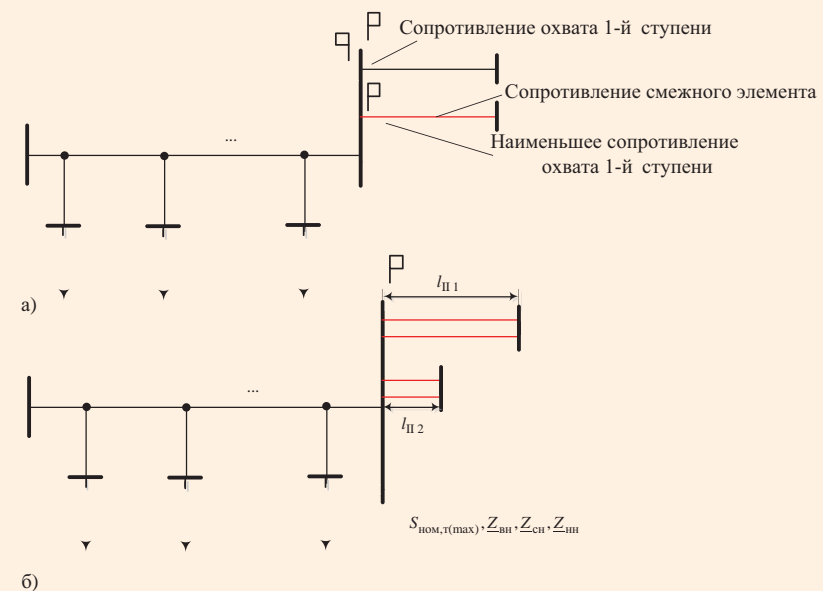


Рис. 5

## УСЛОВИЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ 2-Й СТУПЕНИ



а — выбор минимального значения сопротивления охвата 1-х ступеней защит смежных элементов для задания уставки охвата 2-й ступени;  
б — выбор минимального значения сопротивления смежных двухцепных ВЛ в режиме работы двух цепей и минимального сопротивления смежного трансформатора наибольшей мощности.

Рис. 6

жима) с точки зрения теории автоматического управления не может считаться полностью адаптивной, так как при этом не происходит восполнения априорной информации апостериорной.

Одной из решаемых задач АДЗ является отображение на плоскости предельных границ годографов реле сопротивления в различных режимах (рис. 1). (Годографы построены для реальной ЛЭП с углом передачи  $\pm 20$  эл. град соответственно.)

В процессе изменения параметров нагрузочного режима происходит изменение характеристики адаптивного РС. Форма характеристики перестраивается в зависимости от положения точки замера в нагрузочном режиме, с учетом измерительных и априорных погрешностей должна иметь вид, представленный на рис. 2.

АДЗ ООО «ИЦ «Бреслер» в качестве критерия повреждения использует безусловный признак — резистивность природы повреждения.

В роли элементов реагирования могут выступать реактивные параметры, принимающие нулевое значение в месте повреждения. На основной гармонике параметр выглядит так:

$$\sigma(x) = Q_{f\Sigma}(x) = \sum_{v=A,B,C} \text{Im}[U_v(x) \cdot \dot{I}_v(x)] \quad [1]$$

где  $\dot{U}_v, \dot{I}_v$  — напряжение и ток поперечной ветви;  $v = A, B, C$  — обозначение фаз сети;  $x$  — координаты контролируемой линии.

Общий критерий идентификации повреждения в ЛЭП должен заключаться в требовании  $\sigma^2(x) \rightarrow \min$ . Основная идея реализованного алгоритма АДЗ состоит в определении знаков аварийной реактивной мощности по концам защищаемой зоны:

$$Q(0) = \text{Im} \left( \sum_{v=A,B,C} \text{Im} [\dot{U}_{\text{ав}}(0) \cdot \dot{I}_{\text{ав}}(0)] \right) ;$$

$$Q(l_3) = \text{Im} \left( \sum_{v=A,B,C} \text{Im} [\dot{U}_{\text{ав}}(l_3) \cdot \dot{I}_{\text{ав}}(l_3)] \right) ;$$

где  $l_3$  — координата конца зоны. При разных знаках реактивной мощности по концам зоны фиксируется срабатывание АДЗ, т.е. выполняется условие  $\text{sign}(Q(0)) \neq \text{sign}(Q(l_3))$  [8].

В алгоритм, реагирующий на знаки реактивной мощности по концам зоны защиты, внесен ряд инновационных решений, которые позволили его усовершенствовать.

В результате теоретических изысканий и практических исследований был создан алгоритм АДЗ [9], в котором удалось достичь:

- повышения чувствительности защиты;
- минимального объема расчетов параметров срабатывания защиты при вводе защиты в работу и отсутствия таких операций при дальнейшей эксплуатации, в том числе при изменении параметров защищаемого объекта или режимов его работы;
- отсутствия «мертвой зоны» защиты при близких металлических трехфазных КЗ.

## ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЗАЩИТЫ

Опираясь на резистивную природу повреждения, теоретически можно рассматривать АДЗ с чувствительностью к переходным сопротивлениям величиной сотни и тысячи Ом, т.е. АДЗ пригодна для целей диагностики ЛЭП. Однако универсализм алгоритма функционирования, а также конечная

## РАБОТА «КЛАССИЧЕСКОГО» РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ БЛИЗКИХ ТРЕХФАЗНЫХ КЗ

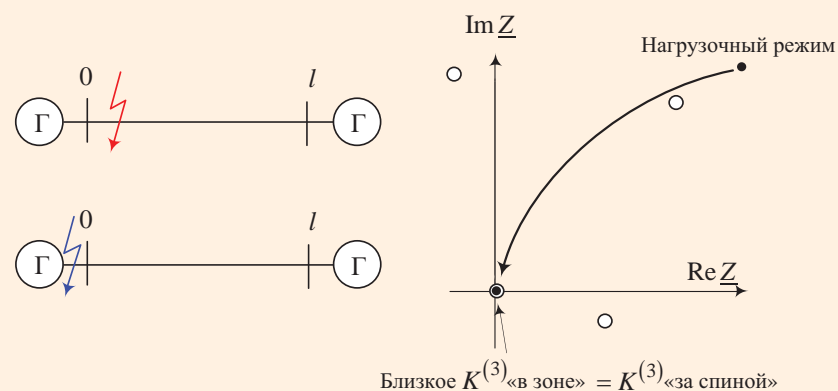


Рис. 7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ НА БЛИЗКОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ТРЕХФАЗНОЕ КЗ ПО АВАРИЙНЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

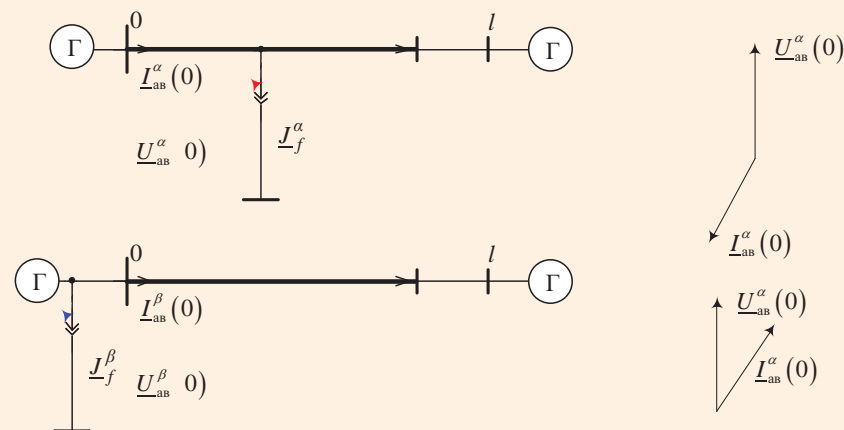


Рис. 8

чувствительность измерительных цепей защиты ограничивают возможности АДЗ. На рис. 3 приведены объектные характеристики адаптивного и «классического» РС для линии «Лосинка — Ленинская»

нефтеюганских сетей «Тюмень-энерго».

Практически по всей длине ЛЭП можно наблюдать значительное (не менее чем в 3 раза) увеличение

чувствительности к переходным сопротивлениям по сравнению с «классической» ДЗ. На рис. 4 показана осциллограмма работы защиты при  $K_c^{(3)} x_f=0,1$  км,  $R_f=70$  Ом, что соответствует точке 1 на рис. 3. Следует отметить, что при увеличении переходного сопротивления в месте КЗ до  $R_f=90$  Ом срабатывания защиты из-за недостаточной чувствительности не происходит, что соответствует положению точки 2 на рис. 3.

## ОТСУТСТВИЕ НЕОБХОДИМОСТИ РАСЧЕТА УСТАВОК

Одна из проблем РЗА, которая усугубилась в последнее время в связи с внедрением МП РЗА и, как следствие, с резким увеличением функциональности защит, является задача расчета параметров срабатывания (уставок) защит.

Эта задача требует решения двух взаимосвязанных задач:

- моделирование (расчет) режимов сети;
- расчет параметров срабатывания защит.

Задача усложняется и тем, что указанные подзадачи решаются разными организациями. Для расчета режимов необходимы параметры эквивалентных систем, которые для расчетных подразделений энергосистем может представить системный оператор.

Поэтому разработка защит, которые требуют минимума расчета параметров срабатывания (например, для ИПФ необходима отстройка от небалансов измерительных цепей) или ввода только информации о параметрах защищаемого объек-

та (например, для АДЗ ЛЭП необходимы длина линии, марки провода троса, тип опор, способ заземления троса или уже рассчитанные погонные параметры), является не только актуальной проблемой с точки зрения выполнения организационных задач, но и уменьшает требования к квалификации персонала, необходимые для расчета параметров срабатывания защит. На рис. 5 приведены все необходимые параметры 1-й ступени АДЗ для линии с отпайками «Лосинка — Ленинская».

Для 2-й ступени АДЗ требуется согласование со ступенями ДЗ (ТЗНП) смежной подстанции

«Ленинская». На рис. 6 показаны условия выбора параметров алгоритмической модели 2-й ступени. Для 3-й ступени задаются сопротивления охвата смежного резервируемого элемента.

## ОТСУТСТВИЕ «МЕРТВОЙ» ЗОНЫ ПРИ БЛИЗКИХ ТРЕХФАЗНЫХ КЗ

На рис. 7 показаны годографы сопротивления «классического» РС при близких трехфазных КЗ у шин

## РАБОТА ЗАЩИТЫ ПРИ БЛИЗКОМ ТРЕХФАЗНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КЗ В ЗОНЕ

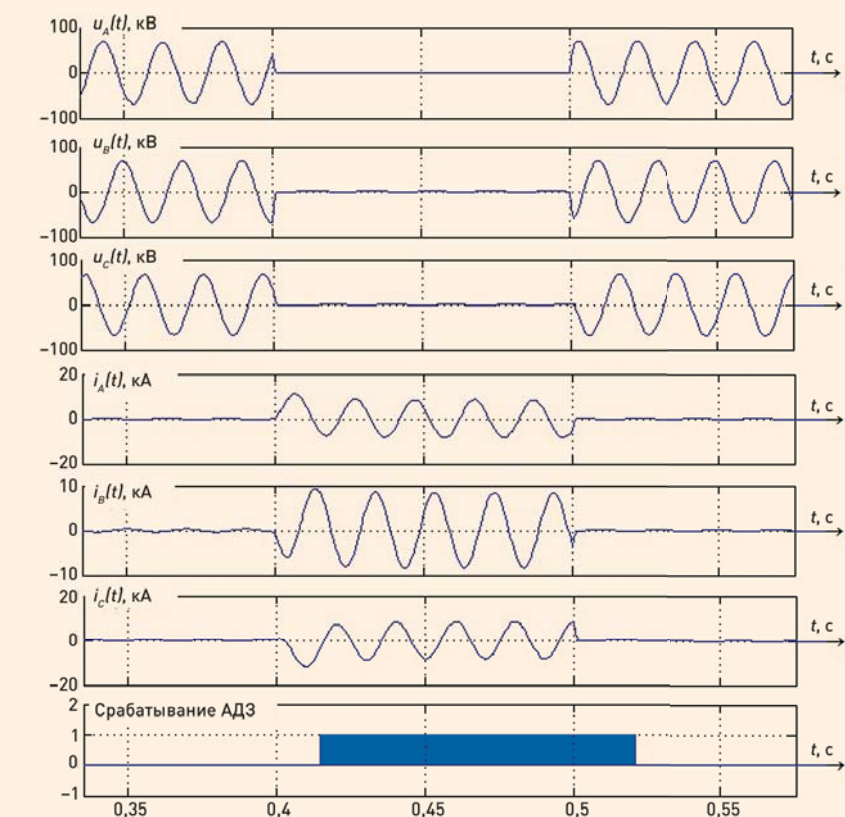


Рис. 9

## РАБОТА ЗАЩИТЫ ПРИ БЛИЗКОМ ТРЕХФАЗНОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КЗ «ЗА СПИНОЙ»

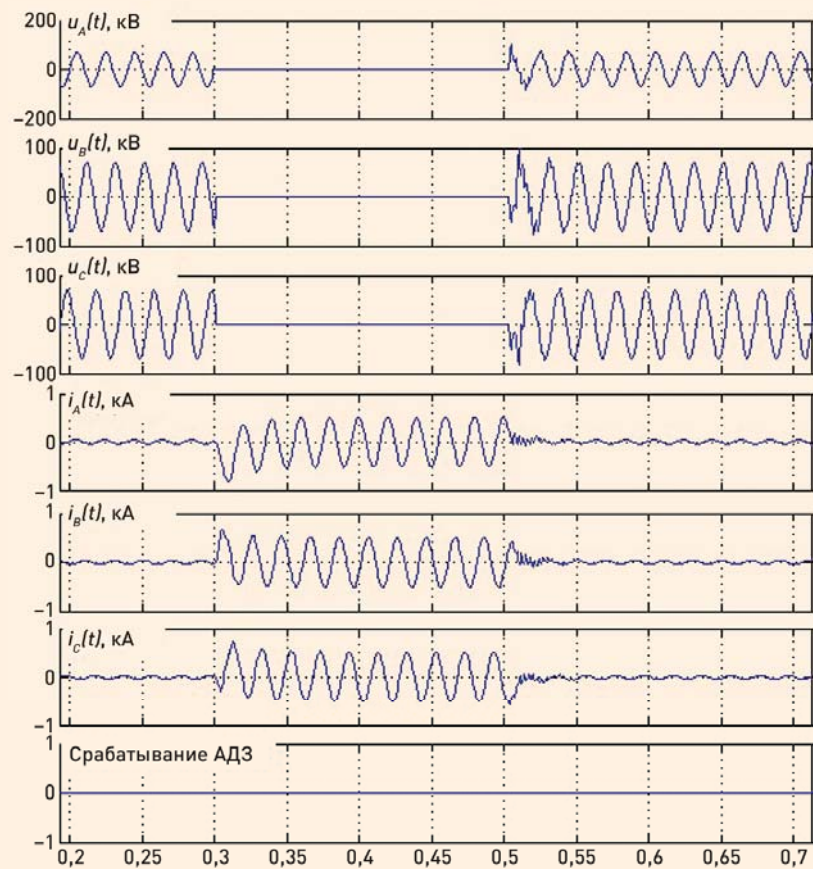


Рис. 10

подстанции. Известно, что ДЗ при  $|U_{\text{н}}| \rightarrow 0$  РС может потерять направленность.

Решение проблемы «мертвой» зоны при близких трехфазных КЗ в АДЗ показано на рис. 8. Для определения направленности использованы аварийные составляющие токов и напряжений. Аварийная составляющая напряжения при близких КЗ практически равна фазному напряжению, что позволяет с большим запасом селективно определять направленность на КЗ.

На рис. 9 показана осциллограмма работы защиты при близком трехфазном КЗ в зоне, на рис. 10 — при близком трехфазном металлическом КЗ «за спиной».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Алгоритм адаптивной защиты, разработанный ООО «ИЦ «Бреслер», обладает большей чувствительностью к КЗ через переходные сопротивления, чем алгоритм «классической» ДЗ.

2. Определение направления на источник КЗ по аварийным составляющим позволяет исключить «мертвую» зону защиты при близких трехфазных КЗ.
3. Алгоритм АДЗ требует не расчета параметров срабатывания измерительных органов, а лишь задания зоны охвата ступеней. Это исключает потребность в данных об эквивалентах питающих сетей и значительно упрощает процедуру параметрирования защиты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Патент США № 5796258. Adaptive quadrilateral characteristic distance relay, 1998 / L. Yang.
2. Патент США № 7872478. Method and adaptive distance protection relay for power transmission lines, 2011 / M. Saha, Rosolowski E., Izykowski J.
3. Патент РФ № 2247456. Способ релейной защиты энергообъекта. БИ, 2005, № 6 / Лямец Ю.Я., Ефимов Е.Б., Нудельман Г.С.
4. Патент РФ № 2248077. Способ дистанционной защиты линии электропередачи. БИ, 2005, № 7 / Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Ефимов Е.Б., Ефремов В.А..
5. Авторское свидетельство СССР № 66343. Устройство для защиты высоковольтных линий передачи от замыканий между фазами, 1944 / А.М. Бреслер.
6. Лямец Ю.Я., Ильин В.А., Подшивалин Н.В. Программный комплекс анализа аварийных процессов и определения места повреждения линии электропередачи // Электричество. 1996. № 12. С. 2–7.
7. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Павлов А.О. Эволюция дистанционной релейной защиты // Электричество. 1999. № 3. С. 8–15.
8. Лямец Ю.Я., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. Диагностика линии электропередачи // Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр. Чебоксары: Изд. ЧГУ, 1992. С. 9–32.
9. Заявка на изобретение РФ № 2015136614. Способ дистанционной защиты линии электропередачи, 2015, МПК H02H3/40.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ РОССИИ



06–09  
ДЕКАБРЯ

2016

Москва, ВДНХ  
МВЦ «МосЭкспо» (пав. 75)

В РАМКАХ ВЫСТАВКИ  
СОСТОИТСЯ  
КОНКУРС ЭКСПОНАТОВ

### При поддержке:

- Министерства Энергетики РФ
- ПАО «ФСК ЕЭС»
- Правительства Москвы
- ЗАО «Техническая инспекция ЕЭС»

### Организаторы:

- «Совет ветеранов энергетиков»
- ЗАО «Электрические Сети»

(495) 771-6564, 963-4817

EXHIBIT@TWEST.RU

WWW.EXPROELECTROSETI.RU

50 лет  
★ ДНЮ ★  
ЭНЕРГЕТИКА

### Разделы выставки:

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА.

Воздушные и кабельные линии электропередачи.

Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики.

АСУ ТП и информатизация, связь, АСКУЭ.



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ПАРТНЕР



ГЕНЕРАЛЬНЫЙ  
ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ПАРТНЕР В СЕТИ  
ИНТЕРНЕТ



ИНФОРМАЦИОННЫЙ  
ПАРТНЕР



ОТРАСЛЕВОЙ ПАРТНЕР

### Информационная поддержка

